

文章编号: 1002-0446(2002)02-0122-04

爬墙式机器人安全系统的动力学变结构控制研究*

严世榕¹ S. K. Tso² 闻邦椿³

(1. 福州大学机械工程系 福建福州 350002; 2. 香港城市大学制造工程与工程管理系 香港九龙;

3. 东北大学机械工程与自动化学院 沈阳 110006)

摘要: 对一般的爬墙式机器人增设一套安全系统是非常重要的。本文的安全系统是由位于屋顶的可前后移动的小车、安装于小车上的一套提升设备和机器人本体组成。由于机器人打滑、吸盘系统失效等原因,这种安全系统有时可能会发生摆动与纵向振动。借助于控制技术,本文研究的安全系统动力学的变结构控制技术可以使系统的摆动与纵向振动快速消失。显然,具有这种控制技术的安全系统可以用于工作于危险状态的检查与清洁机器人中。

关键词: 爬墙式机器人; 安全系统; 动力学; 变结构控制

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

STUDY OF VARIABLE STRUCTURE CONTROL TECHNOLOGY OF SAFETY SYSTEM DYNAMICS OF A CLIMBING ROBOT

YAN Shi-rong¹ S. K. Tso² WEN Bang-chun³

1. Dept of Mechanical Engineering, Fuzhou University, Fujian 350002;

2. Dept of MEE, City University of Hong Kong, Hong Kong;

3. School of Mechanical Engineering, Northeastern University, Shenyang, 110006)

Abstract Attachment of a safety system to a wall-climbing robot is very important to guarantee safety and reliable work of the robot. Because the safety system is a wire suspension system made of a roof vehicle which can move to and fro, a winding system installed in the vehicle, and a robot itself, sometimes the safety system will swing and vibrates longitudinally just because of slip, failure of a vacuum system, etc. How to control the swing and vibration of the system is studied in the paper. Using variable-structure control techniques, amplitudes of longitudinal vibration and swing of the suspension system can be reduced obviously. So the safety device with variable-structure control system can be used in inspecting and cleaning robots working in dangerous situations.

Keywords: wall-climbing robot, safety system, dynamics, variable-structure control

1 引言(Introduction)

利用机器人从事高层建筑的擦窗、清洁墙壁等在世界范围内得到越来越广泛得重视。直到现在,大多数擦窗机器人、清洁墙壁机器人在工作时使用爬行装置。由于工作环境复杂难以预料,爬墙式行走装置因打滑等有可能失效,必须考虑该类机器人工作于高层建筑外墙时的安全问题。通常为了防止这些机器人从高空落下,一般也不容许机器人高速移动,从而大大减小了其工作效率。将一套安全装置引入爬墙式机器人中就是为了克服这些缺点,并确保机

器人工作时的安全。这对于一直处于危险状态的爬墙式机器人来说是十分必要的,也是其可靠工作的前提。

本文设计的安全系统是由一套钢绳提升系统、可前后移动的屋顶小车和机器人本体组成。由于打滑、真空吸盘装置失效、风力等原因,该安全系统有时可能发生摆动或纵向振动。具有安全系统的爬墙式机器人在任何情况下,应避免发生摆动或纵向振动,从而保证正常工作。由于安全系统是柔性悬挂系统,属于非线性动力学系统,且机器人工作过程中,

* 基金项目:福建省自然科学基金(E0110014)和福建省教育厅科学基金(K2001014)资助。

收稿日期: 2001-07-30

其有关动力学参数又是随之变化的, 故它又是时变系统。为此, 安全系统的动力学特性是很复杂的且难以控制。如果安全系统设计不合理, 它可能无法工作, 甚至是情况更为严重。文献给出了分析具有非线性动力学特性的机械系统方法。由于本系统的非线性与时变性, 以及外载荷的突变性与随机性, 仅满足某种工况的最优动态设计的安全系统仍无法满足这里的需要。引进动力学控制是不可缺少的一种手段。如何对这种动力学进行控制是本文要研究的一个重要内容。近年来, 振动主动控制得到越来越大的发展和应用。Tzou, Fuller, Young, Tso, Zhou 等人利用自适应控制、变结构控制、模糊控制等手段进行不同场合下的动力学控制, 取得较为理想的结果。考虑到一般非线性控制方法对于这样时变的非线性动力学系统难以取得理想效果, 以及在线控制的方便, 本文利用变结构控制进行该安全系统的动力学控制研究, 期望找到一种既简单实用又可靠工作的控制途径。本文的控制目的是使安全系统的摆动和纵向振动尽快消失, 保证机器人处于正常与安全状态。

2 安全系统的动力学模型 (Dynamic model of the safety syetem)

本文设计的安全系统是, 将机器人通过钢绳提升设备与位于屋顶的小车连接起来。小车可以前后移动, 其驱动力可以自由调节; 提升设备的加减速也可以独立调节。这样, 该安全系统可以跟随机器人的运动, 即当机器人运动时, 小车时而前行, 时而后退, 提升设备时而放绳, 时而卷绳。根据其工作原理与力学分析, 本文得到其动力学模型如图 1 所示。式(1)则为其对应的动力学数学模型。

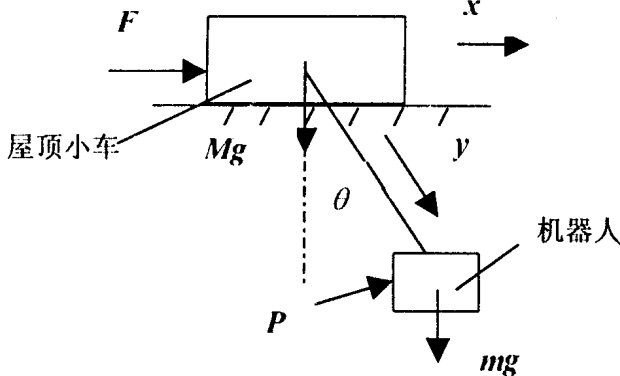


图 1 安全系统动力学模型

Fig. 1 Dynamic model of the safety system

图 1 中, F 代表小车自身驱动力, y 代表钢绳变

形, θ 代表钢绳与铅垂线的夹角, P 代表作用在机器人上除了钢绳张力与其自身重力外其它各力的合力。

在式(1)中, M 为小车质量, x 为小车位移, F 为小车驱动力, T 为钢绳张力, m 为机器人质量, a 与 v 分别为提升加速度与速度, f_2, f_3 为粘性阻尼系数, α 为合力 P 与水平线所夹角度。

$$\begin{cases} M\ddot{x} - F - T\sin\theta = 0 \\ m(a + \ddot{y}) + m\ddot{x}\sin\theta + T + f_2(v + \dot{y}) - mg\cos\theta - m\dot{\theta}^2(l + y) - P\sin(\theta - \alpha) = 0 \\ m(l + y)\ddot{\theta} + mg\sin\theta + m\ddot{x}\cos\theta + f_3(l + y)\dot{\theta} - P\cos(\theta - \alpha) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

由于机器人跟墙壁接触等状态不同, 合力 P 具有三种不同的形式, 即式(2)所示。

$$P = \begin{cases} 0, & \text{没有接触且无外扰} \\ p_1 - & \text{没有接触时外扰大小} \\ p_2 - & \text{接触墙壁时合力大小} \end{cases} \quad (2)$$

为简化数值计算与分析, 式(1)的另一种形式即状态方程形式如式(3)所示。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = g\cos x_3 + \dot{x}_4^2(l + x_1) - \dot{x}_6\sin x_3 - EA x_1/lm - f_2(v + x_2)/m - a + P\sin(x_3 - \alpha)/m \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = (-g\sin x_3 - \dot{x}_6\cos x_3)/(l + x_1) - f_3 x_4/m + P\cos(x_3 - \alpha) \\ \dot{x}_5 = x_6 \\ \dot{x}_6 = (F + EA x_1\sin x_3/l)/M \end{cases} \quad (3)$$

这里, E 为钢绳杨氏模量, A 为钢绳横截面积, $x_1 = y, x_2 = \dot{x}_1, x_3 = \theta, x_4 = \dot{x}_3, x_5 = x, x_6 = \dot{x}_5$ 。

由式(3), 安全系统在不同情况下的运动规律和大小马上可以得到。本文最关心的是, 机器人与墙壁没有接触, 但受到风力作用等情况, 因为此时安全系统的摆动与纵向振动将是最大的。图 2 就是这样的一种情况。由该图可以发现, 安全系统的摆动与纵向振动将持续很长时间而不会自动消失。在图 2 情况中, 此时, $M = 270\text{kg}, m = 40\text{kg}, l = 30\text{m}, P = 0, f_2 = f_3 = 4.0, A = 0.02\pi\text{cm}^2, E = 2.1E + 7\text{N cm}^{-2}$ 。图 2 中, x_1 和 x_5 量纲为 m, x_2 量纲为 $\text{m s}^{-1}, x_3$ 为 rad, x_4 为 $\text{rad. s}^{-1}, T_t$ 与 F_t 为 N , 加速度 a 为 m s^{-2} 。

很明显, 若要安全系统的摆动与纵向振动快速消失, 必须引进一定的控制量。这里控制的目的是,

尽快使摆动角 θ 与钢绳纵向变形 y 分别变为零和一个不变量,同时使屋顶小车的位移尽量小。控制时,将小车驱动力 F 和提升加速度 a 作为两个控制量。

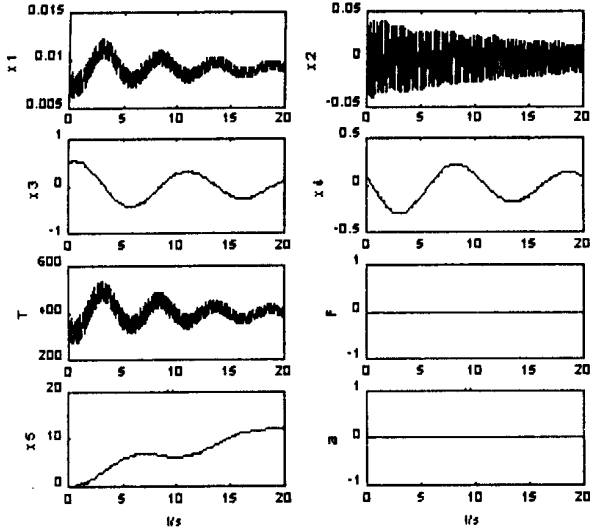


图2 安全系统一种自由振动情况
Fig. 2 Simulation of one kind of free vibration of the safety system

3 安全系统动力学变结构控制 (Dynamic variable structure control of a safety system)

由于本系统为时变非线性的,故利用变结构控制技术进行动力学控制。由于需要控制两个变量 F 和 a ,故这里要建立两个滑移平面 s_1, s_2 ,它们分别满足式(4),即

$$\begin{cases} s_1 = c_1x_1 + c_2x_2 \\ s_2 = c_3x_3 + c_4x_4 \end{cases} \quad (4)$$

对应的控制规律由下面的式(5)推出

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = c_1\dot{x}_1 + c_2\dot{x}_2 = -\epsilon_1 \text{sgn}s_1 - k_1s_1 \\ \dot{s}_2 = c_3\dot{x}_3 + c_4\dot{x}_4 = -\epsilon_2 \text{sgn}s_2 - k_2s_2 \end{cases} \quad (5)$$

这里,系数 c_1, c_2, c_3, c_4 需精心挑选以确保控制系统收敛、鲁棒和稳定;常数 $\epsilon_1, \epsilon_2, k_1, k_2$ 均为精心挑选的正数,以保证一定的收敛速度与控制效果。

由式(4)和式(5),可以推出保证系统的摆动与纵向振动快速消失的控制规律如下

$$\begin{cases} a = (c_1x_2 + \epsilon_1 \text{sgn}s_1 + k_1s_1)/c_2 + g\cos x_3 + x_4^2(l + x_1) - x_6^2\sin x_3 - EAx_1/l - f_2(v + x_2) \\ F = [c_3x_4 + \epsilon_2 \text{sgn}s_2 + k_2s_2 - c_4g\sin x_3/(x_1 + l) - c_4f_3x_4/m]M(x_1 + l)/(c_4\cos x_3) - EAx_1\sin x_3/l \end{cases} \quad (6)$$

由式(3)和式(6),借助数值积分,可以研究在这样控制规律作用下的系统的控制效果。图3就是这

样的一个例子。图中的动力学参数、代号、量纲等均与图2时相同。很明显,控制效果相当好,很快使系统的摆动与纵向振动消失。为进一步了解控制系统的鲁棒性和可靠性,研究系统在附加另一个干扰下的控制结果。图4即为这样一种情况。

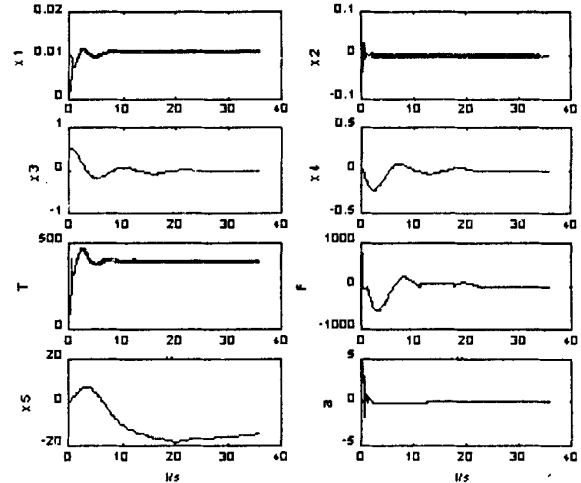


图3 变结构控制结果(参数同图2)

Fig. 3 Simulation under the condition of a variable structure control technique with the same dynamic parameters as Fig. 2

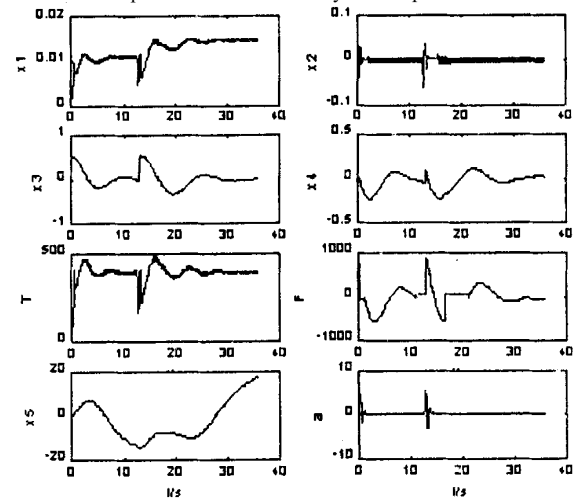


图4 两次干扰时控制效果

Fig. 4 Control simulation of the same safety system under two different disturbances

显然,即使系统遭遇两次干扰,且在后一次的干扰更大的情况下,仍能快速地使安全系统静止下来,达到预期要求。考虑到爬墙式机器人工作范围较大,这里又研究了在提升系统处于不同悬垂高度时的控制情况。图5与图6即为其中的两种情况。图5为同一个安全系统对应15米悬垂高度,且遭受两次干扰下的控制结果,图6则对应悬垂高度5米,遭受两次干扰时的控制情况。又这两个图可见,不论系统处在何

处, 即使受到两次的干扰, 本文设计的变结构控制器均能使其快速可靠的消除摆动与振动, 达到要求。可见本文这里设计的变结构控制方法可以很好地工作。由于这里仅针对摆动和钢绳纵向振动加以控制, 对屋顶小车的位移要求不高, 仅是位移要小些, 故在控制时仅引进“ $\text{If } x_5 > b_p \ \& \ x_6 > 0, \ F = 0; \ x_5 < -b_n \ \& \ x_6 < 0, \ F = 0$ ”, 其它情况不加以干预。这里, b_p, b_n 为两个正常数。

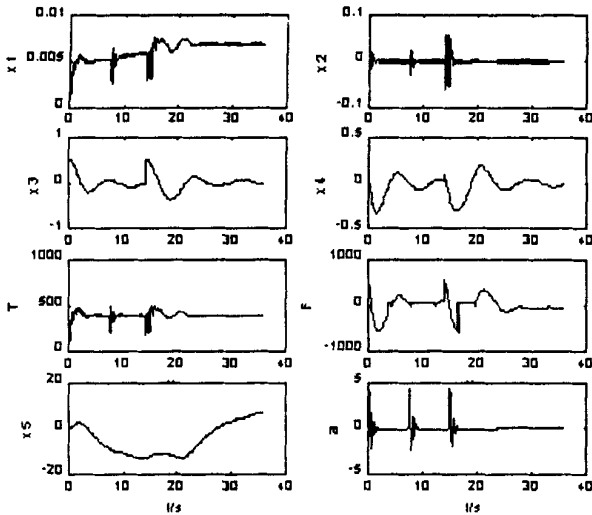


图 5 悬垂高度 15 米时控制结果

Fig. 5 Control simulation of the same system under two same disturbances with a rope suspension length 15m

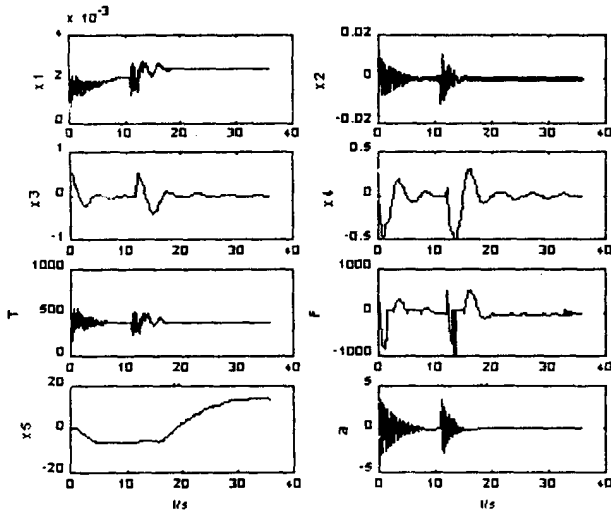


图 6 悬垂高度 5 米时控制效果

Fig. 6 Control simulation of the same system under the same disturbances with a rope suspension length 5m

4 结论(Conclusion)

安全系统在各种情况下, 必须处于良好与可靠的状态。为保证爬墙式机器人的安全系统处于这样

的状态, 本文设计的动力学变结构控制方法可以较好地解决这个问题, 并保证在不同工作条件和两次干扰下均可靠快速地消除系统的摆动与纵向振动。

参考文献 (References)

- 1 S K Tso, Y H Fung, W L Chow, etc. Design and impletation of a glass-wall cleaning robot for high-rize buildings. Proceedings of World Automation Congress, Hawaii, 2000. 6, paper ISORA 123
- 2 C Balaguer, A Gimenez, J M Pastor, etc. A Climbing Autonomous Robot for Inspection Application in 3D Complex Environments. Robotica, 2000, 18: 287- 297
- 3 D A Chamberlain and G J Bleakley. Curio NDT Robot for the Construction Industry, Industrial Robot, 1994, 21(4): 29- 31
- 4 S Chen, T Sattar, A Khalid, etc. Climbing Robots-Off the Shelf, Industrial Robot, 1994, 21(5): 27- 30
- 5 Jack Hollingum. Hazardous climb to industrial recognition. Industrial Robot, 1997, 24(2): 135- 139
- 6 H S Tzou, L A Bergman. Dynamics and Control of Distributed Systems, Cambridge: Cambridge University Press, 1998
- 7 C R Fuller, S J Elliott and P A Nelson. Active Control of Vibration. London: Academic Press Limited, 1996
- 8 K K David Young. Variable Structure Control for Robotics and Aerospace Application. Amsterdam: Elsevier Science Publisher B V, 1993
- 9 S K Tso, T W Yang, W L Xu. Flexible-Link Robot Arm With Active Vibration Suppression For Enhanced Automation. Proceedings of 7th Inter-national Conference on Production Engineering, Design and Control, Alexandria, Egypt, 2001. 2 : 971- 981
- 10 Zhou F X, Fisher G. Continuous Sliding Mode Control, Int J. Control, 1991, 55(2): 313- 327
- 11 S K Spurgeon, R Davies. A nonlinear control strategy for robust sliding mode performance in the presence of unmatched uncertainty. Int J Control, 1993, 57(5): 1107- 1123
- 12 B S Heck, A A Ferri. Application of output feedback to variable structure systems. J Guidance, Control and Dynamics, 1989, 12(6): 932- 935
- 13 Xinghuo Yu. Discrete variable structure control systems. Int J Systems SCI, 1993, 24(2): 273- 386
- 14 C Y Chan. Servo-systems with discrete-variable structure control, System and Control Letter, 1991, 17: 321- 325
- 15 Shirong Yan, Investigation of Dynamics of Winding Equipment and Construction Machinery and their control. PhD Dissertation, Northeastern University of China, 2000
- 16 W L Xu, S K Tso, X S Wang. Sensor-based deflection modelind and compensation control of flexible robot manipulator. Mechanism and Machine Theory, 1998, 33(7): 909- 924
- 17 Jon Juel Thom sen. Vibrations and Stability. Berkshire: McGraw-Hill Publishing Company, 1997
- 18 A H Nayfeh, D T Mook. Nonlinear Oscillations. New York: John Wiley & Sons, 1979